ARBOCARTO

Arbocarto-v3

Rapport final

Mathieu Castets, CIRAD
Marie Demarchi
Renaud Marti, INRAE
Annelise Tran, CIRAD

arbocarto@teledetection.fr

Marie Demarchi

cirad

INRAE

tetis

ASTRE

Ce rapport a été élaboré dans le cadre du financement accordé par la Direction Générale de la Santé (DGS) pour l'étude ARBOCARTO 3 portant sur le développement d'un module de prédiction de transmission de maladies par les moustiques vecteurs à ajouter à l'outil ARBOCARTO de la DGS.

Référence à citer :

Castets M., Demarchi M., Marti R., Tran A., 2023. ARBOCARTO V3 – Rapport final. Montpellier (France) : CIRAD, 32 pages.

© Cirad, Environnement et Sociétés / Unité Mixte de Recherches Territoires Environnement Télédétection et Information Spatiale, 2023.

SOMMAIRE

Introduction 8

> Contexte 8

> Objectifs 9

> Acteurs du projet 10

> Organisation du projet 10

> Contenu du rapport 10

Réalisation d'un module de cartographie prédictive du risque de transmission des maladies vectorielles et intégration à l'outil Arbocarto 11

> Présentation générale de l'outil 11

> Modélisation du R0 de la dengue 12

> Interface utilisateur 12

Cartographie du risque de transmission de la dengue sur les sites pilotes 14

> Production de jeux de données sur les sites pilotes 14

> Validation du module R_0 (Ile de la Réunion) 15

> Simulation du R_0 à l'échelle des communes, régions Corse, Occitanie et Provence Alpes Côte d'Azur, année 2022 16

Formation et ateliers utilisateurs 18

> Mise à jour de la documentation technique 18

> Sessions de formation 19

> Retours des utilisateurs sur les versions précédentes 21

> Synthèse des formations 24

Communication 25

> Site internet 25

> Publications et communications scientifiques 26

> Communication auprès des élus et acteurs de santé 26

Conclusion et perspectives 27

Références bibliographiques 29

RESUME

Développé par le CIRAD et Marie Demarchi et propriété de la Direction Générale de la Santé (DGS), le logiciel ARBOCARTO est conçu comme une interface intuitive entre un modèle de dynamique de populations des moustiques du genre *Aedes*, responsables d'arboviroses et de fortes nuisances, et les acteurs impliqués dans la mise en place de stratégies d'actions de lutte antivectorielle et de prévention des maladies vectorielles (contributeurs au SI-LAV). A partir de données météorologiques quotidiennes et de données environnementales, le logiciel ARBOCARTO permet aux utilisateurs de cartographier, à une échelle spatiale fine, les densités de populations de moustiques *Aedes.*

Depuis sa première version livrée à l'état de démonstrateur en 2019, l'outil a évolué vers une deuxième version opérationnelle en 2022 sur tous les territoires français (Territoires ultra marins et France hexagonale), avec l'intégration de nouvelles fonctionnalités pour simuler différentes actions de lutte antivectorielle (destruction mécaniste de gîtes de ponte, actions larvicides et adulticides). Suite à une demande de la DGS de poursuivre le développement de l'outil, l'équipe d'ARBOCARTO vient de produire une version 3, objet de ce rapport, qui intègre désormais un module de calcul du taux de reproduction de base (R_0) pour le virus de la dengue, transmis par les moustiques *Aedes*.

Les cartes de R_0 produites par l'outil Arbocarto-v3 sur les différents sites montrent une bonne réactivité de l'indice simulé aux tendances spatiales et temporelles observées. Ces cartes de R_0 offrent une information supplémentaire pour les acteurs de santé publique, en venant compléter les autres données de santé (en particulier du SI-LAV) dans le processus de prise de décision. D'autre part, durant le projet, deux sessions de formation au logiciel ARBOCARTO-V3, avec la documentation technique et les jeux de données d'entrée de l'outil mis à jour, ont été organisées en Martinique et à Montpellier, avec au total 38 participants. Ces ateliers utilisateurs ont également permis des échanges sur les différentes utilisations de l'outil par les évolutions souhaitées. Enfin, plusieurs actions de communication ont été menées pour la valorisation de l'outil.

LISTE DES ABREVIATIONS

ARS-NA	Agence Régionale de Santé – Nouvelle Aquitaine
ARS-AURA	Agence Régionale de Santé – Auvergne Rhône Alpes
ARS-OCC	Agence Régionale de Santé – Occitanie
Bti	*Bacillus thuringiensis israelensis*
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CTM	Collectivité Territoriale de Martinique
DFA	Départements Français d'Amérique
DGS	Direction Générale de la Santé
DSI	Direction des Systèmes d'Information
EIDMED	Entente Interdépartementale de démoustication Méditerranée
EIRAD	Entente Interdépartementale de démoustication Auvergne Rhône Alpes
INRAE	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement
IRIS	Ilots Regroupés pour l'Information Statistique
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
INSEE	Institut National de la Statistiques et des Etudes Economiques
LAV	Lutte Anti-Vectorielle
SI-LAV	Système d'Information dédié à la prévention des maladies vectorielles et à la lutte antivectorielle
TETIS	Territoires Environnement Télédétection Information Spatiale
UMR	Unité Mixte de Recherche

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Départements colonisés par le moustique tigre en France métropolitaine, 1er janvier 2022[1]8

Figure 2 : Evolution du nombre de cas autochtones d'arboviroses en France métropolitaine, 2010–2022. Source : (Cochet et al., 2022) 9

Figure 3 : Schéma de fonctionnement de l'outil ARBOCARTO - données d'entrée (a, d, f), interface (e), modèle biologique intégré (b), et sorties générées (c). Source : Marti et al. (2022) 11

Figure 4 : Capture d'écran de l'interface Arbocarto permettant de piloter le modèle de dynamique de population des moustiques Aedes albopictus et Aedes aegypti..... 13

Figure 5 : Illustration - Construction des jeux de données avec un découpage fin : exemples sur la Réunion, Mayotte, Montpellier – densités de population humaine (source : INSEE)..... 14

Figure 6 : Illustration - Construction des jeux de données à l'échelle des îlots IRIS : exemples sur Bordeaux, Grenoble, et Strasbourg – densités de population humaine (source : INSEE)..... 15

Figure 7 : Exemples de sorties de l'outil Arbocarto-v3 - estimation du R0 de la dengue, Ile de la Réunion, 2018..... 15

Figure 8 : Exemples de sorties de l'outil Arbocarto-v3 - estimation du R_0 de la dengue, régions Corse, Occitanie et Provence Alpes Côtes d'Azur, juin-septembre 2022 17

Figure 9 : Illustration - extrait de l'addendum du Guide méthodologique sur les données - Arbocarto v3 18

Figure 10 : Programme de la session de formation de Septembre 2022 20

Figure 11 : Programme de la session de formation de Mai 2023..... 21

Figure 12 : Capture d'écran du site de l'ARS Mayotte présentant la carte du risque vectoriel pour la période du 25 au 28 avril 2023 produite avec Arbocarto..... 22

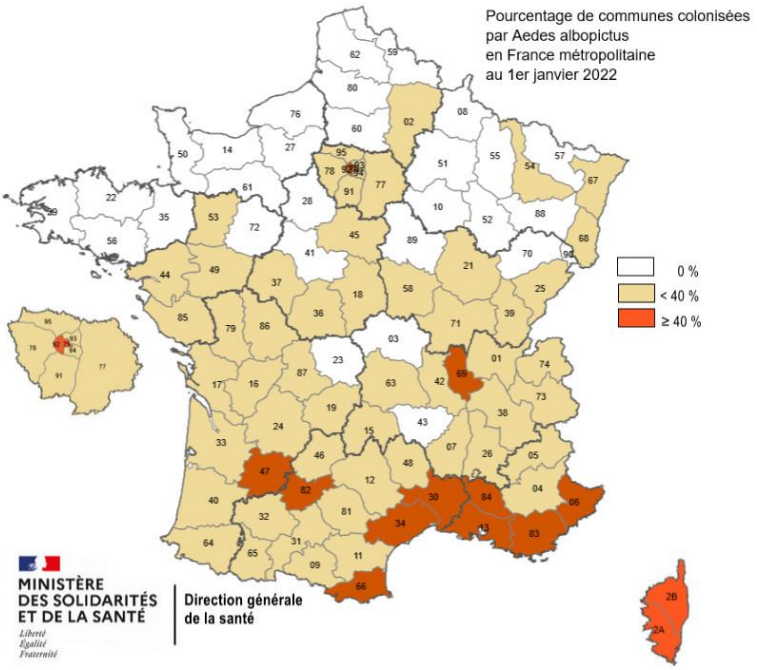
Figure 13 : Captures d'écran du site www.arbocarto.fr, formulaire de demande de mise à disposition et rubrique des actualités. 25

INTRODUCTION

> CONTEXTE

Les moustiques *Aedes albopictus* ('moustique tigre') et *Aedes aegypti* sont les principaux vecteurs des virus de la dengue, du chikungunya, du Zika, et sont deux espèces pleinement adaptées aux milieux urbains. *Ae. albopictus* est présent dans l'Océan Indien (Réunion et Mayotte) et dans de nombreux départements de France hexagonale. *Ae. aegypti* est présent aux Antilles, en Guyane et dans l'Océan indien.

La présence concomitante de populations de moustiques vecteurs et d'arbovirus est à l'origine d'épidémies intenses dans les différents territoires outre-mer et constitue un risque important également pour la France hexagonale, où le moustique 'tigre', implanté depuis 2004 dans les départements du sud-est, continue son expansion[1] (Figure 1).



« Début 2023, 71 départements sont colonisés par le moustique vecteur *Aedes albopictus* (sur les 96 départements métropolitains) »

Source : Ministère de la Santé et de la prévention - Cartes de présence du moustique tigre en France métropolitaine

Figure 1 : Départements colonisés par le moustique tigre en France métropolitaine, 1er janvier 2022[1]

En 2022, neuf événements de transmission autochtone de la dengue ont été identifiés en France métropolitaine, avec un total de 65 cas autochtones (Cochet et al., 2022). Même si seules quelques communes ont été concernées, que les foyers étaient de taille modeste et qu'il n'a pas été observé de forme grave, cette situation, exceptionnelle en termes d'incidence et d'expansion géographique par rapport aux années précédentes (Figure 2), a mis en évidence le besoins d'outils permettant d'anticiper l'émergence sur l'ensemble du territoire français de nouveaux foyers ou épidémies et d'appuyer les acteurs de santé publique dans leurs actions de surveillance et de prévention. En particulier, **l'application SI-LAV** (Système d'Information dédié à la prévention des maladies vectorielles et à la lutte antivectorielle), permet aux Agences Régionales de Santé (ARS) et aux différents opérateurs de démoustication de saisir leurs informations sur le terrain, et de produire en temps réel des cartes pour guider localement la prévention, le dépistage et les interventions selon les poussées épidémiques (Comité de Veille et d'Anticipation des Risques Sanitaires (COVARS), 2023).

[1] https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/risques-microbiologiques-physiques-et-chimiques/especes-nuisibles-et-parasites/article/cartes-de-presence-du-moustique-tigre-aedes-albopictus-en-france-metropolitaine

Complémentaire à l'application SI-LAV, **Arbocarto** est un outil de cartographie prédictive des densités de populations d'*Aedes* vecteurs à partir de données météorologiques (températures et pluviométrie quotidienne) et de télédétection à haute et très haute résolution spatiale, développé à la demande de la Direction Générale de la Santé (DGS) (sous-direction de la veille et de la sécurité sanitaire, bureau des risques infectieux émergents et des vigilances, bureau système d'information et informatique de proximité) par des chercheurs du CIRAD et Marie Demarchi, ingénieure en géomatique. Arbocarto permet de produire des cartes à une échelle spatiale adaptée à l'organisation des actions de surveillance et de contrôle menées par les acteurs de la lutte antivectorielle dans différents départements français, cartes qui peuvent être intégrées au SI-LAV, comme information complémentaires aux informations de terrain, et ainsi d'appuyer la stratégie de lutte et de surveillance mise en œuvre par les services de lutte anti-vectorielle dans les différents départements français.

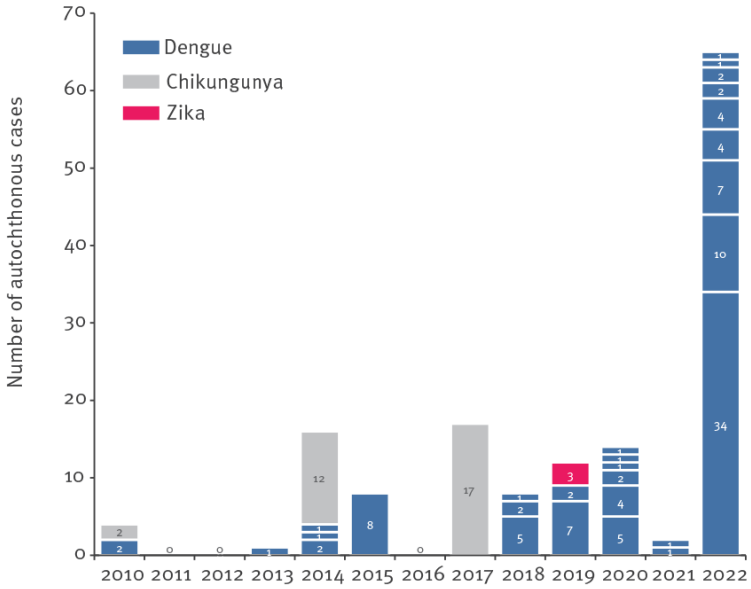


Figure 2 : Evolution du nombre de cas autochtones d'arboviroses en France métropolitaine, 2010–2022. Source : (Cochet et al., 2022)

La DGS est propriétaire de l'outil, diffusé sous licence libre CECILL C aux Agences régionales de santé et à leurs opérateurs de démoustication qui en font la demande. Cette diffusion a fait l'objet de la note d'information n° DGS/VSS1/2020/15 du 13 janvier 2020. Depuis 2023, un formulaire en ligne est disponible sur le site www.arbocarto.fr pour effectuer cette demande.

Depuis la version 1 d'ARBOCARTO (démonstrateur livré en 2019), l'outil a évolué vers une version opérationnelle sur tous les sites (V2 livrée en 2022), avec l'intégration de nouvelles fonctionnalités pour simuler des actions de lutte antivectorielle. A la demande de la DGS, une équipe de chercheurs de l'Unité Mixte de Recherche (UMR) Territoires Environnement Télédétection et Information Spatiale (TETIS) et Marie Demarchi ont développé une version 3, objet de ce rapport, qui intègre désormais un module de calcul du taux de reproduction de base (R_0) pour le virus de la dengue, transmis par les moustiques *Aedes*.

> OBJECTIFS

L'objectif général du développement d'Arbocarto-v3 était d'intégrer le calcul du taux de reproduction de base (R_0) pour le virus de la dengue transmis par les moustiques *Ae. albopictus* et *Ae. aegypti*. Cet indicateur de risque épidémiologique permet d'appréhender le risque d'occurrence de nouveaux cas à partir de l'introduction d'un premier cas dans une population sensible, et est donc particulièrement adapté pour évaluer le risque épidémique, qui dépend des abondances des moustiques vecteurs (prédites par les versions précédentes d'Arbocarto), mais également des caractéristiques du virus et des populations humaines.

Les **objectifs spécifiques** du projet ARBOCARTO-V3 concernaient :

- le développement du module de gestion du taux de reproduction de base (R_0) du virus de la dengue ainsi que son intégration au logiciel ARBOCARTO ;
- la mise à jour de la documentation technique ;
- la formation des utilisateurs.

> ACTEURS DU PROJET

Le projet ARBOCARTO-V3 (juillet 2022-juin 2023) a été coordonné par le CIRAD (UMR TETIS), prestataire pour le Ministère français de la santé. Il a mobilisé différents chercheurs de l'UMR TETIS, du CIRAD (Mathieu Castets, Annelise Tran) et de l'INRAE (Renaud Marti). Une partie des tâches a été réalisée en sous-traitance par Marie Demarchi, ingénieure indépendante et co-autrice de l'outil.

Les bénéficiaires du projet sont les Agences régionales de santé et leurs opérateurs de démoustication. Tout au long du projet des échanges réguliers avec les utilisateurs d'ARBOCARTO ont été effectués, et de nouveaux utilisateurs ont pu être formés lors des sessions de formation :

- En France hexagonale : ARS Nouvelle Aquitaine – DD33, ARS Auvergne-Rhône-Alpes, - DD38, ARS Occitanie, Conseil Départemental de Charente maritime, EID Méditerranée (EIDMED), EID Rhône-Alpes (EIRAD), Altopictus, Syndicat de lutte contre les moustiques du Bas-Rhin
- Océan Indien : ARS Réunion, ARS Mayotte
- Départements Français d'Amérique (DFA) : ARS Martinique, Collectivité Territoriale de Martinique (CTM), ARS Guadeloupe

> ORGANISATION DU PROJET

Le projet ARBOCARTO-V3 comportait les phases suivantes :

- Phase 1 - Initialisation du projet : organisation d'une réunion de lancement avec les partenaires et les différents bénéficiaires et établissement du calendrier détaillé.
- Phase 2 – Réalisation d'un module de cartographie prédictive du risque de transmission des maladies vectorielles et intégration à l'outil ARBOCARTO.
- Phase 3 – Mise à jour de la documentation technique et formation des utilisateurs
- Phase 4 – Réalisation de cartes prédictives sur 3 sites pilotes

> CONTENU DU RAPPORT

Ce rapport final présente l'ensemble des résultats pour les phases 1, 2, 3 et 4 et est organisé de la manière suivante :

- Présentation du module de cartographie prédictive du R_0
- Application : cartographie du R0 sur les sites pilotes
- Formations utilisateurs
- Actions de communication
- Conclusions et perspectives

REALISATION D'UN MODULE DE CARTOGRAPHIE PREDICTIVE DU RISQUE DE TRANSMISSION DES MALADIES VECTORIELLES ET INTEGRATION A L'OUTIL ARBOCARTO

> PRESENTATION GENERALE DE L'OUTIL

L'outil ARBOCARTO est constitué d'une **interface utilisateur** qui permet de piloter **un modèle de dynamique de population de moustique** (pour les détails, se référer au chapitre d'ouvrage (Marti et al., 2023)). Ce modèle est basé sur un modèle générique (Cailly et al., 2012; Ezanno et al., 2015), adapté aux moustiques *Aedes* (Tran et al., 2013, 2020) et prenant en compte les caractéristiques de l'environnement urbain (Marti et al., 2020).

Le modèle de dynamique de population de moustiques est un modèle « en compartiments », qui repose sur le cycle de vie commun à toutes les espèces de moustiques qui comprend des stades aquatiques immatures (œufs, larves nymphes) et un stade aérien, où les moustiques vont alors alterner des comportements de reproduction, d'alimentation, de repos, et de dispersion jusqu'à leur mort. Les transitions entre stades ainsi que les taux de mortalité dépendent généralement de la température et des précipitations et peuvent être établies à partir de résultats d'études expérimentales.

D'autre part, la distribution des gîtes potentiels pour la ponte et le développement des stades larvaires va contraindre les variations spatiales d'abondance des populations de moustiques. Ces gîtes sont de faibles dimensions pour *Ae. aegypti* et *Ae. albopictus* (petits récipients, coupelles, pneus, cavités, etc.) et leur mise en eau peut être due à une action naturelle (précipitations) ou artificielle (arrosage). Ces caractéristiques, définies dans un « fichier environnemental », constituent avec la pluie et la température les informations d'entrée du modèle. Les sorties du modèle sont, pour chaque parcelle du « fichier environnemental », le nombre d'individus dans chaque stade (œuf, larve, nymphe, adulte) à la date souhaitée, ou sur une période donnée (Figure 3).

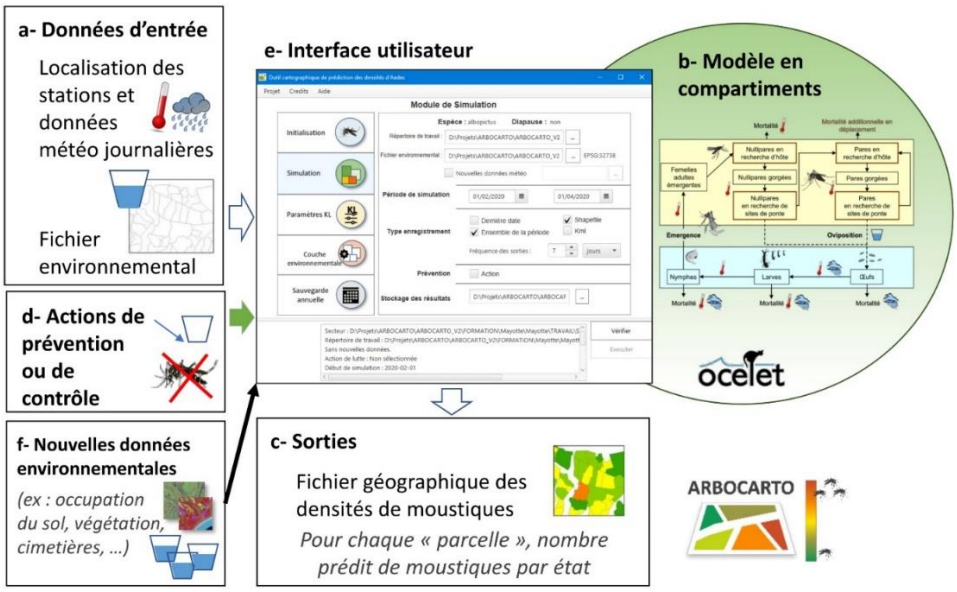


Figure 3 : Schéma de fonctionnement de l'outil ARBOCARTO - données d'entrée (a, d, f), interface (e), modèle biologique intégré (b), et sorties générées (c). Source : Marti et al. (2022)

Le modèle a été implémenté dans le langage de programmation Ocelet (ocelet.org).

L'interface Arbocarto permet à l'utilisateur d'accéder aux choix des grandes variables du modèle : choix de l'espèce, de la période et du lieu de simulation (Figure 3). Elle permet également :

- de paramétrer le fichier environnemental de départ en fonction de la typologie de l'occupation du sol ou de la végétation, ou en ajoutant des informations géographiques complémentaires comprenant la localisation de sites producteurs de gîtes larvaires (par exemple : cimetières, garages, jardins familiaux, terrasses à plot, ventes de plantes, maisons abandonnées…) ;
- de lancer des simulations selon différents scénarios de lutte antivectorielle (destruction des gîtes larvaires, utilisation de larvicides, pulvérisation d'insecticides ciblant les stades adultes).

La sortie des résultats est fournie sous format géographique (formats Shapefile ou KML), compatibles avec l'application SI-LAV.

> MODELISATION DU R0 DE LA DENGUE

$$R_0 = \frac{ma^2bp^n}{-r\ln(p)} \qquad \text{(Equation 1)}$$

Avec m le nombre de femelles moustiques / personne ; a le taux de piqûre journalier ; p le taux de survie journalier du vecteur ; n la durée d'incubation extrinsèque ; b la compétence vectorielle ; r le taux de guérison

Le taux de reproduction de base (le nombre de cas secondaires générés par l'introduction d'un premier cas infecté, dans une population sensible, par le biais de la population de moustiques) a été estimé par la formule du R_0 de McDonald (Smith et al., 2012) pour une maladie à transmission vectorielle (Equation 1).

Le R_0 est un indicateur épidémiologique très utilisé pour estimer le risque épidémique car il intègre une notion de seuil très importante : si la valeur du R_0 est supérieure à 1, il y a un risque d'épidémie ; en deça de la valeur 1, le foyer s'éteint.

Les composantes du R_0 relatives à la dynamique de population de moustiques (abondance m, taux de survie p, taux de piqure a) sont calculées par le modèle de dynamique de population de l'outil Arbocarto.

Les composantes du R_0 relatives à la transmission du virus de la dengue (compétence vectorielle b, durée d'incubation extrinsèque n et taux de guérison chez l'humain r) ont été estimées par une revue de la littérature scientifique (études expérimentales et observationnelles) (Benkimoun et al., 2021).

L'estimation de la population humaine (nécessaire pour estimer le nombre de femelles moustiques par personne), est une donnée d'entrée fournie par l'utilisateur. Ces informations sont disponibles pour la France à l'échelle des îlots IRIS (Ilots Regroupés pour l'Information Statistique) de l'Institut National de la Statistiques et des Etudes Economiques (INSEE).

Le module du calcul du R_0 a été implémenté sous le logiciel Ocelet, déjà utilisé pour le modèle de dynamique de population de moustiques.

> INTERFACE UTILISATEUR

Avec l'ajout du module de calcul du R_0, l'interface utilisateur n'a pas été modifiée (Figure 4) : le calcul est automatiquement effectué si l'information sur la population humaine est présente dans le « fichier environnemental » fourni en entrée de l'outil Arbocarto.

La sortie des résultats est toujours effectuée sous format géographique (formats Shapefile ou KML). Une estimation du R_0 (valeur numérique supérieure ou égale à zéro) est simplement ajoutée aux estimations des densités de moustiques.

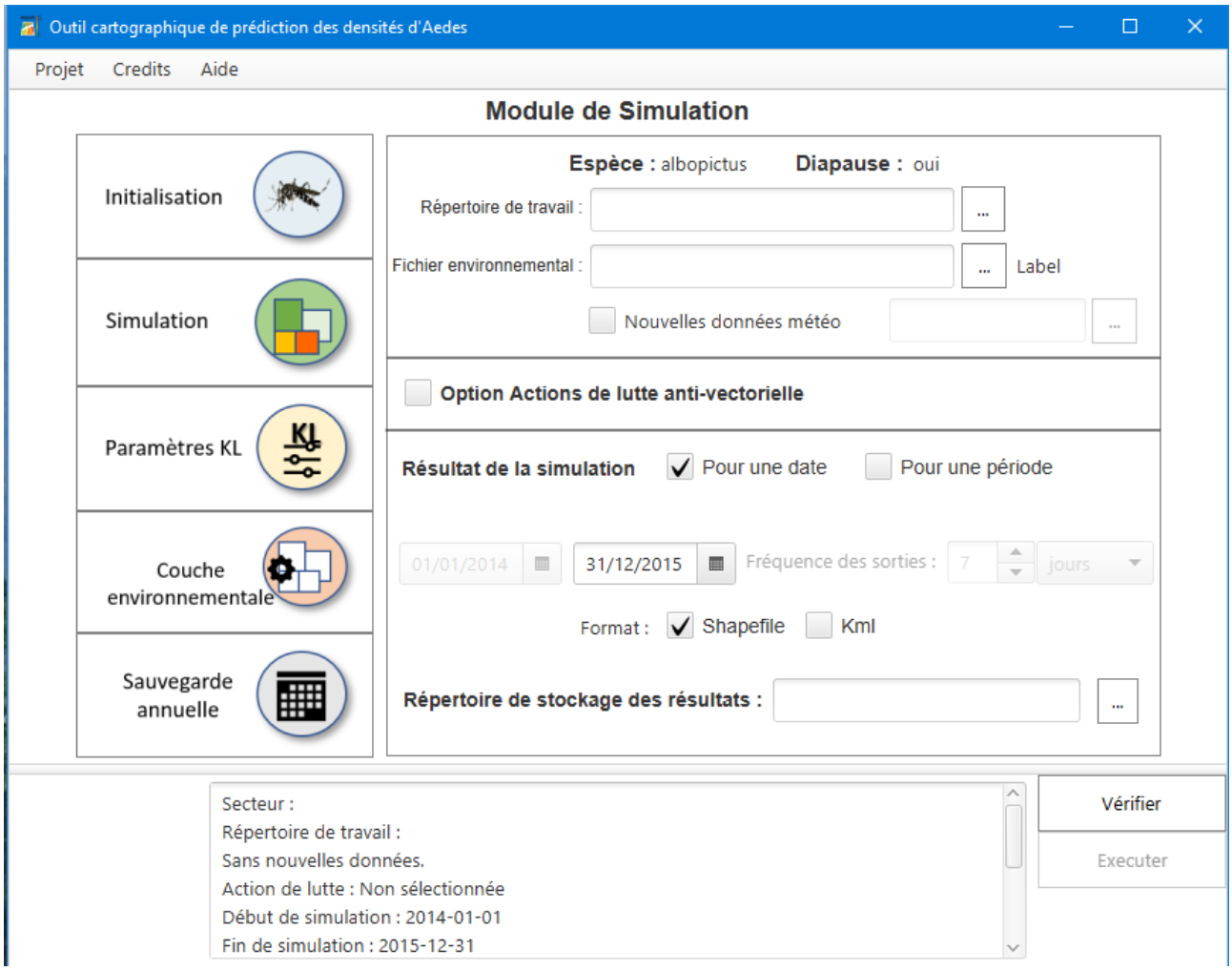


Figure 4 : Capture d'écran de l'interface Arbocarto permettant de piloter le modèle de dynamique de population des moustiques Aedes albopictus *et* Aedes aegypti.

CARTOGRAPHIE DU RISQUE DE TRANSMISSION DE LA DENGUE SUR LES SITES PILOTES

> PRODUCTION DE JEUX DE DONNEES SUR LES SITES PILOTES

Initialement, trois sites pilotes, un en France Métropolitaine (Montpellier), un dans l'Océan indien (Ile de la Réunion) et un dans les Départements Français d'Amérique (Martinique), étaient envisagés dans le projet ARBOCARTO-V3. Cependant, compte tenu du nombre d'organismes de santé ayant manifesté leur intérêt pour la mise en œuvre de l'outil sur leurs zones, des jeux de données supplémentaires ont été créés ou complétés pour un total de 8 sites :

- En France hexagonale : Montpellier, Grenoble, Bordeaux, Strasbourg
- Dans les DFA : Guadeloupe, Martinique
- Dans l'Océan Indien : Réunion, Mayotte

Pour chacun des sites, la production des jeux de données d'entrée du logiciel Arbocarto a consisté selon le cas à collecter les données météorologiques nécessaires (localisation des stations Meteo-France, téléchargement des fichiers de pluies et température sur la publithèque Meteo-France) et à préparer ou compléter les données du fichier environnemental (découpage du territoire d'intérêt en parcelles), de manière à ce que celui-ci contiennent les informations sur la capacité de charge environnementale (par l'estimation du nombre de gîtes de ponte disponible par parcelle), l'altitude, et la population humaine.

Pour certains sites (Ile de la Réunion, Mayotte, Guadeloupe, Montpellier), un découpage en zones d'intervention était pré-existant et a été complété par une estimation des données de population (Figure 5). Pour les sites sur lesquels aucun découpage pré-existant n'était disponible, le découpage en îlots de référence de l'INSEE a été utilisé (Figure 6). Les jeux de données ainsi constitués ont été ensuite utilisés lors des formations utilisateurs.

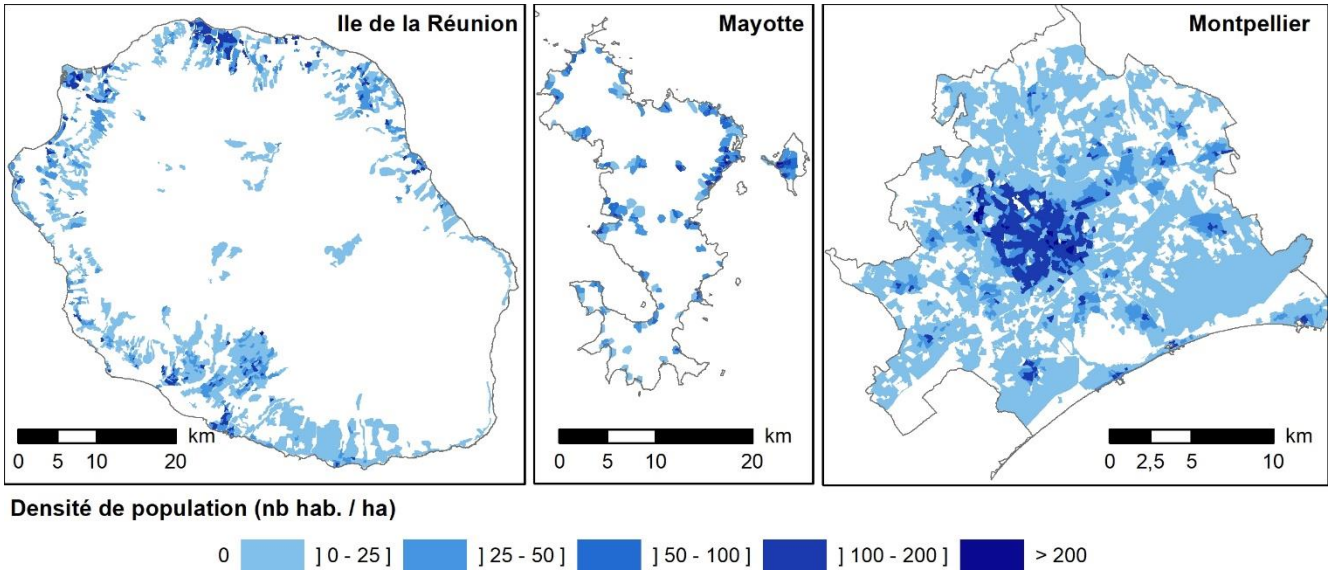


Figure 5 : Illustration - Construction des jeux de données avec un découpage fin : exemples sur la Réunion, Mayotte, Montpellier – densités de population humaine (source : INSEE).

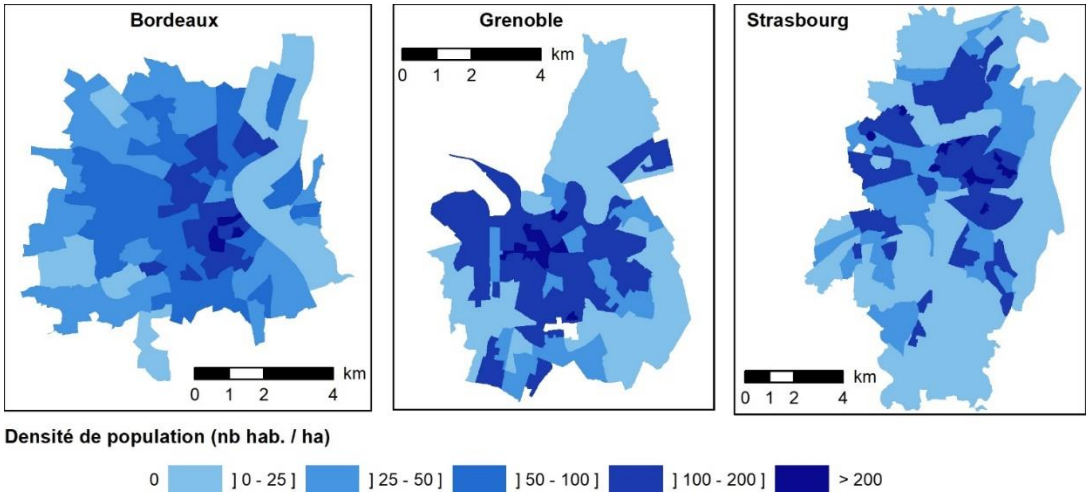


Figure 6 : Illustration - Construction des jeux de données à l'échelle des îlots IRIS : exemples sur Bordeaux, Grenoble, et Strasbourg – densités de population humaine (source : INSEE).

A noter : une difficulté rencontrée a concerné l'estimation du nombre d'habitants pour les quartiers de Mayotte- en effet les données de l'INSEE pour ce département datent de 2017, alors que la dynamique de population est très importante. Pour pallier ce manque de données, une méthode reposant sur le comptage du nombre de bâtis par parcelle (données IGN) a été proposée et mise en œuvre.

> VALIDATION DU MODULE R_0 (ILE DE LA REUNION)

La validation des cartes produites de R_0 sur les différents sites nécessite des données épidémiologiques (cas confirmés de dengue et leur localisation). Lors d'une étude précédente (Benkimoun et al., 2021), l'analyse de ces données avait pu être réalisée en collaboration avec l'ARS Réunion pour l'année 2018. Les résultats avaient montré :

- Une variabilité spatiale et saisonnière importante de l'indice R_0 à la Réunion (Figure 7) ;
- Une corrélation significative entre les valeurs de R_0 estimées à l'échelles des IRIS et l'incidence de la dengue, et une bonne prédiction des foyers observés dans le Sud et l'Ouest de l'île ;
- Une corrélation significative entre la dynamique saisonnière des valeurs de R_0 prédites et la dynamique observée de l'intensité de transmission de la dengue (pour davantage de détails se référer à l'article précédemment cité).

Cette forte réactivité de l'indice R_0 aux tendances spatiales et temporelles montre que les cartes produites par l'outil Arbocarto-v3 constituent des informations solides pour les décideurs de santé publique, et qu'il est possible d'intégrer aux autres données de santé (par exemple celles de l'application SI-LAV) afin de mettre en œuvre des actions de prévention et de contrôle adaptées.

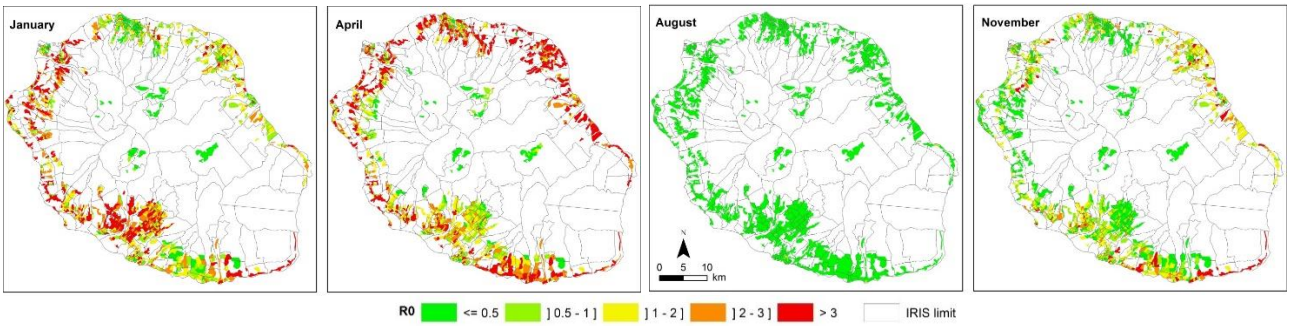


Figure 7 : Exemples de sorties de l'outil Arbocarto-v3 - estimation du R0 de la dengue, Ile de la Réunion, 2018

> SIMULATION DU R_0 A L'ECHELLE DES COMMUNES, REGIONS CORSE, OCCITANIE ET PROVENCE ALPES COTE D'AZUR, ANNEE 2022

En France hexagonale, l'année 2022 a connu une situation épidémiologique exceptionnelle en termes d'incidence de la dengue et d'expansion géographique (Figure 2) (Cochet et al., 2022). Dans le cadre du projet ARBOCARTO-V3, afin de tester le module R0, des simulations ont été réalisées pour estimer la variabilité spatiale et temporelle du R_0 de la dengue, à l'échelle des communes, en 2022.

Considérant qu'à cette échelle, les principales variations du risque sont liées aux différences météorologiques de températures et pluviométrie, les simulations ont été réalisées en considérant des capacités de charges environnementales standards identiques pour toutes les communes (simulations pour un même quartier de type résidentiel, avec le même nombre de gîtes de ponte potentiels et d'habitants[2]). Les données météorologiques de 372 stations météorologiques couvrant l'ensemble du territoire ont été téléchargées depuis la publithèque de Meteo-France (période : 01/01/2021 – 30/10/2022).

Les résultats des simulations (Figure 8) illustrent la variabilité spatiale et saisonnière des valeurs du R_0 de la dengue entre les régions Corse, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Occitanie :

- L'augmentation du R_0 apparaît plus précoce sur le pourtour Méditerranéen dès le mois de juin, en comparaison avec l'ouest de la région Occitanie (Figure 8, Juin) ; les deux foyers de dengue détectés au mois de Juin (Perpignan et Fayence) sont localisés dans les zones présentant les valeurs les plus élevées du R_0.
- Au mois de Juillet, les communes situées en basse altitude des trois régions – littoral corse, pourtour Méditerranéen, vallée de la Garonne, sont prédites à risque ; les communes avec les valeurs prédites de R_0 les plus élevées sont localisées dans l'est de la région PACA, où apparait le foyer de Gattières, où a été rapporté le plus grand nombre de cas (Figure 8, Juillet).
- Les valeurs prédites du R_0 augmentent ensuite jusqu'à atteindre leur maximum au mois d'Août, avec une extension géographique importante, notamment dans l'ouest de la région Occitanie, avec des valeurs de R_0 très élevées. Plusieurs évènements de transmission autochtones ont été identifiés dans ces zones à la fin de l'été (Montauban, La Salvetat Saint Gilles) ou y restent actifs (Rabastens-de-Bigorre) (Figure 8, Août).
- Enfin, on peut noter que les foyers qui sont restés actifs le plus longtemps (Gattières, Saint Laurent du Var) sont situés en région PACA, dans des communes où les valeurs de R_0 prédites sont restées élevées sur toute la période Juin-Septembre.

Il convient de noter qu'aucun foyer n'a été rapporté dans certaines zones pourtant prédites à risque (valeurs de R_0 élevées) comme par exemple les agglomérations de Montpellier, Nîmes et Marseille. En effet, par construction, l'indice R_0 est défini comme le nombre de cas secondaires causé par l'apparition d'un premier cas dans une population sensible, et ne reflète donc pas le risque d'introduction, qui dépend de la mobilité humaine. D'autre part, à cette échelle les incertitudes sont nombreuses sur le paramétrage des entrées - en particulier la capacité de charge environnementale, les valeurs de l'indice R_0 doivent donc être interprétées de manière relative (pour comparer des périodes ou des zones entre elles).

Malgré cette limite, la comparaison des cartes avec les neuf foyers de dengue identifiés en 2022, montrent que les estimations du risque sont cohérentes avec la distribution spatiale et temporelle des foyers. Ces premiers résultats illustrent la pertinence de l'outil Arbocarto comme outil de prédiction des zones à risque,

[2] Paramètres de simulation : KLfix=KLvar=2000 ; POP = 2000

et ce, à différentes échelles (échelle locale pour des actions de prévention et de contrôle ciblées, et échelle régionale ou nationale pour contribuer à la préparation à l'apparition de nouveaux foyers autochtones).

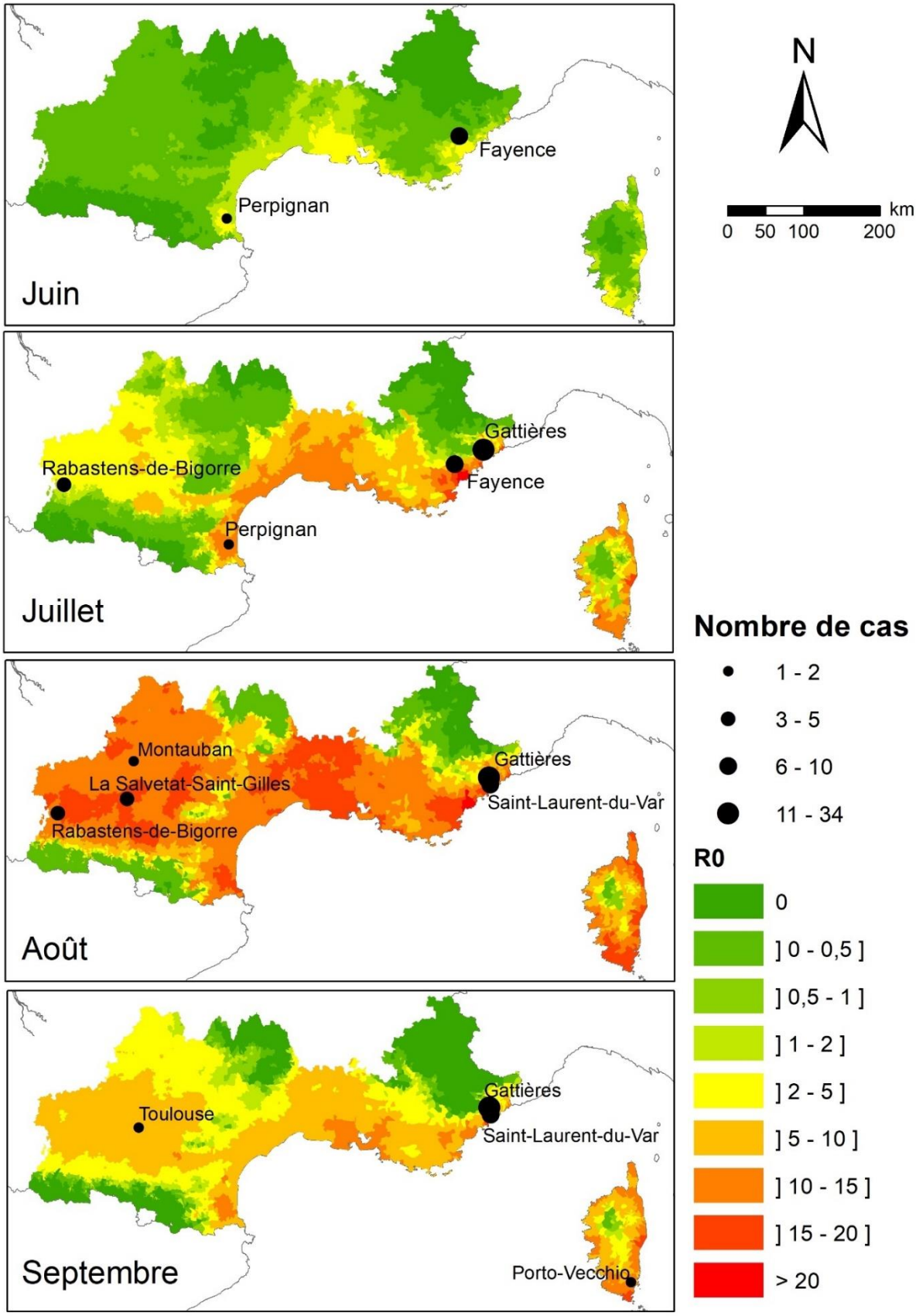


Figure 8 : Exemples de sorties de l'outil Arbocarto-v3 - estimation du R_0 de la dengue, régions Corse, Occitanie et Provence Alpes Côtes d'Azur, juin-septembre 2022

FORMATION ET ATELIERS UTILISATEURS

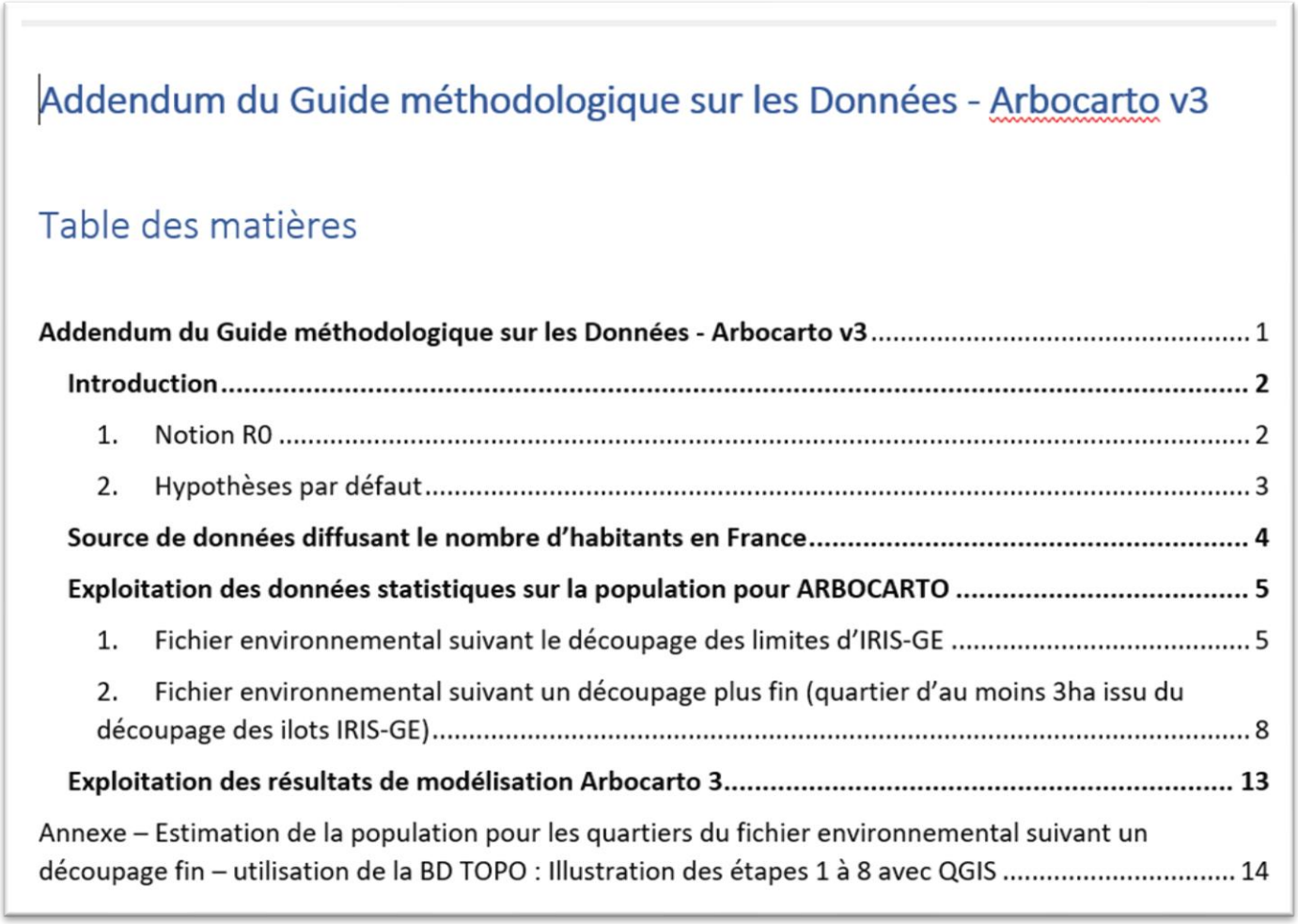
> MISE A JOUR DE LA DOCUMENTATION TECHNIQUE

La documentation technique relative à l'outil ARBOCARTO est composée des éléments suivants :

- Un manuel utilisateur
- Un guide méthodologique pour la production des données d'entrée de l'outil ARBOCARTO
- De fiches de travaux pratiques pour la prise en main d'ARBOCARTO

Ces documents ont été mis à jour pour ARBOCARTO V3, par la rédaction d'un Addendum du Guide méthodologique sur les Données (Figure 9), ainsi que la mise à jour des fiches de travaux pratiques.

L'ensemble de la documentation relative à ARBOCARTO est disponible sur le site internet dédié : https://www.arbocarto.fr/documentation



Addendum du Guide méthodologique sur les Données - Arbocarto v3

Table des matières

Addendum du Guide méthodologique sur les Données - Arbocarto v3 1

Introduction 2

1. Notion R0 2
2. Hypothèses par défaut 3

Source de données diffusant le nombre d'habitants en France 4

Exploitation des données statistiques sur la population pour ARBOCARTO 5

1. Fichier environnemental suivant le découpage des limites d'IRIS-GE 5
2. Fichier environnemental suivant un découpage plus fin (quartier d'au moins 3ha issu du découpage des ilots IRIS-GE) 8

Exploitation des résultats de modélisation Arbocarto 3 13

Annexe – Estimation de la population pour les quartiers du fichier environnemental suivant un découpage fin – utilisation de la BD TOPO : Illustration des étapes 1 à 8 avec QGIS 14

Figure 9 : Illustration - extrait de l'addendum du Guide méthodologique sur les données - Arbocarto v3

> SESSIONS DE FORMATION

Deux sessions de formation au logiciel ARBOCARTO-V3 ont été organisées durant le projet. Le choix des dates de formation a été établi selon les disponibilités des participants et la période plus creuse en matière de lutte antivectorielle : calage en juin 2022 pour la session de septembre 2022, calage en janvier 2023 pour la session de mai 2023.

Les formations ont été organisées en mode hybride pour permettre d'initier un plus grand nombre d'agents intéressés venant d'organismes différents :

- Une première session a été organisée en Martinique en septembre 2022 avec comme public concerné des agents de la Collectivité Territoriale de Martinique (CTM) et des ARS Martinique et Guadeloupe.
- Une deuxième session a été organisée à Montpellier, dans les locaux de la Maison de la Télédétection, en mai 2023 avec des participants des ARS Réunion et Mayotte ainsi que différents participants de plusieurs sites en France métropolitaine (voir tableau ci-après). Des agents de la CTM s'étaient également inscrits mais n'ont finalement pas pu participer en raison de la gestion du démarrage de l'épidémie de dengue en Martinique.

Synthèse des participants par session de formation

Sessions	Inscrits	Présence effective (à distance ou sur site)	Organismes présents (nb agents présents)	Nb nouveaux utilisateurs présents par organisme
Septembre 2022	10	10	CTM (8) ARS Guadeloupe (2)	CTM (5) ARS Guadeloupe (2)
Mai 2023	32	28* *Démarrage épidémie de dengue en Martinique. Les agents inscrits n'ont pu participer.	ARS Réunion (6) ARS Mayotte (5) ARS Occitanie (2) ARS Nouvelle Aquitaine-Direction Gironde (2) Conseil Départemental Charente Maritimes (2) ARS Auvergne Rhône Alpes – Direction Isère (2) EIRAD (1) EIDMED (3) Altopictus (3) Syndicat de lutte contre les moustiques 67 (1) Cirad (1)	ARS Réunion (4) ARS Mayotte (4) ARS Occitanie (1) ARS Nouvelle Aquitaine-DD33 (2) ARS Auvergne Rhône Alpes – Direction Isère (2) EIDMED (1) Altopictus (3) Syndicat de lutte contre les moustiques 67 (1)

Programme des sessions de formation

En septembre 2022 le programme a été organisé de manière « standard » c'est-à-dire avec un apprentissage progressif (Figure 10) car les participants constituaient le même public tout au long de la semaine et de niveau d'utilisation similaire d'Arbocarto.

La semaine de formation et échanges entre utilisateurs en mai 2023 a été organisée de la manière suivante (fonction des disponibilités des utilisateurs selon leur niveau de pratique) en créant une journée spécifique aux nouveaux utilisateurs (Figure 11).

Figure 10 : Programme de la session de formation de Septembre 2022

MARDI 9 MAI (dédié aux utilisateurs avancés)	
Heure	Description
8h30-9h	Accueil et test visio
9h-10h	Présentation Arbocarto v3 et le module R0
10h15 – 12h30	TP sur le module R0 (données supplémentaires en entrée, analyse des résultats)
Après-midi	TP libre / support accompagnement
JEUDI 11 MAI (Tous)	
8h30-9h	Accueil et test visio
9h-10h30	Retours utilisateurs
10h45 – 12h30	Perspectives d'évolution de l'outil
Après-midi	TP libre / support accompagnement
VENDREDI 12 MAI (Utilisateurs débutants)	
8h30-9h	Accueil et test visio
9h-9h30	Présentation du fonctionnement Arbocarto et notions associées
9h30-10h	Présentation de l'interface Arbocarto et démonstration
10h15 – 12h30	Données d'entrée / organisation des dossiers TP Prise en main (simulation simple, visualisation et analyse des résultats)
14h – 15h30	TP préparation des données (fichiers météorologiques, fichiers environnementaux)
15h45-17h	TP simulations avancées (tests des actions de contrôle, R0 et analyse des résultats)

Figure 11 : Programme de la session de formation de Mai 2023

> RETOURS DES UTILISATEURS SUR LES VERSIONS PRECEDENTES

Au cours de l'atelier utilisateurs de mai, les utilisateurs avancés ont présenté leurs utilisations d'Arbocarto ou les perspectives envisagées. Ils ont également pu exprimer les éventuels problèmes rencontrés et les souhaits d'évolution ou attentes diverses.

Exemples d'utilisations opérationnelles (fréquence d'utilisation régulière)

[ARS Réunion] Utilisations opérationnelles en période épidémique et au démarrage/fin d'épidémie :

- Exploitation du résultat de la modélisation pour le stade « moustiques femelles en recherche d'hôte »
  - En « début » et « fin » d'épidémie : objectif de priorisation pour définir les zones d'atomisation préventive de Bti
  - En période épidémique : objectif de mobilisation auprès des communes
    - information sur les quartiers prioritaires pour des actions de salubrité publique et de mobilisation sociale

- bilan (bimensuel => trimestriel) pour les communes sans cas

- Exploitation des résultats de la modélisation du stade « œufs » : pendant l'hiver austral, par le Laboratoire d'entomologie de l'ARS, pour la sélection des quartiers pour obtenir des niveaux de ponte suffisants pour le démarrage de la surveillance par Pièges Pondoirs sur les communes d'altitude

[ARS Mayotte] Utilisation opérationnelle hebdomadaire avec communication auprès de la presse (écrite et radio), des communes et via le site web de l'ARS pendant la saison des pluies : diffusion de la carte avec densité de l'ensemble des moustiques femelles adultes (Figure 12).

Figure 12 : Capture d'écran du site de l'ARS Mayotte présentant la carte du risque vectoriel pour la période du 25 au 28 avril 2023 produite avec Arbocarto

Autres exemples d'utilisations : création de nouveaux supports de modélisation et validations

[ARS Guadeloupe] : Création d'une base de connaissance sur la capacité de charge de l'environnement adaptée à la Guadeloupe et mise en place d'un protocole de capture entomologique pour valider les sorties du modèle en 2023 (deux stages réalisés en 2023)

[France métropolitaine] : Création des découpages fins support à la modélisation sur d'autres communes que celles des jeux de données de formation

Exemples de perspectives d'utilisations

[tous les sites] Intégration du R_0 pour :

- Anticiper la priorisation des zones à traiter en cas d'épidémie
- Communiquer et sensibiliser les communes

[Isère] Création d'une application (sur smartphone) à la demande des communes (type participatif avec renseignement de la nuisance, information sur ce que la population peut faire et montrer ce que les communes réalisent). Intégration des cartes prédictives issues d'Arbocarto

[Bordeaux] Cartographie plus détaillée autour des établissements de santé, suivi temporel

[ARS Réunion] Prise en compte dans les modélisations de nouveaux points noirs identifiés sur le terrain et modélisation comparative des actions de LAV réalisées, à présenter aux communes, afin de maintenir la mobilisation des communes dans leurs efforts de prévention (réduction du nombre de gîtes larvaires)

Problèmes rencontrés dans l'utilisation d'Arbocarto

Ils sont liés essentiellement aux jeux de données d'entrée :

- Données météorologiques :
  - Délais dans la mise en place de la convention avec Météo France pour avoir accès aux données de pluies et températures
  - Pour certaines stations, non continuité de service de la disponibilité des relevés des stations météos, données manquantes- malgré la typologie des stations retenues, délais de mise à disposition des données météorologiques sur la publithèque Météo-France (ex. à Mayotte)
- La préparation du « fichier environnemental » demande du temps en amont, pour les utilisateurs qui n'ont pas déjà de découpage en zones d'intervention (par exemple les sites de France hexagonale)
- Data Insee / IGN sur la population humaine : information incomplète (Mayotte) – une solution de contournement a été mise en œuvre pour la formation, pour permettre à l'ARS d'exploiter la fonction du calcul du R_0.

Un autre problème concerne l'installation d'ARBOCARTO : en général les utilisateurs ne disposent pas des droits d'installation sur leur poste et doivent faire appel au service informatique pour l'installation d'Arbocarto. Une solution serait qu'Arbocarto soit une application reconnue des Directions des Systèmes d'Information (DSI) des ARS pour faciliter l'installation qui est très simple.

Souhaits d'évolution de l'outil

Plusieurs types d'évolution de l'outil ont été évoqués :

- Amélioration de l'interface : mise en place d'un curseur ou plus d'information lors de la création du fichier environnemental, pré-visualisation des résultats de la simulation
- Automatisation des traitements : pouvoir automatiquement récupérer les données météo, et lancer en routine (voire sans interface) Arbocarto pour produire les cartes à intégrer dans une autre application destinée aux communes ;

A noter que certains problèmes rencontrés par les utilisateurs des versions précédentes sont déjà corrigés par la version 3.

Par ailleurs certains utilisateurs ont exprimé un besoin d'accompagnement complémentaire pour la production des jeux de données d'entrée, et de lieux/temps d'échanges entre utilisateurs pour mutualiser les retours d'expérience (par exemple sur les utilisations des cartes en cas d'épidémie, les protocoles de visite intra-domiciliaire, la construction d'une base de données partagée sur la typologie des gites et leur productivité à partir des données du SILAV, …).

Enfin, les perspectives envisagées comme enrichir le panel des actions de lutte antivectorielle à modéliser, mesurer l'impact du changement climatique, prendre en compte la recolonisation, … ont suscité un vif intérêt.

> SYNTHESE DES FORMATIONS

A chaque session de formation, l'ensemble des notions a pu être traité par les participants. Ils ont exprimé leur satisfaction et volonté de poursuivre l'utilisation de l'outil, voire de le promouvoir auprès d'autres services ou autres ARS. A noter que certains services (ARS Réunion, EIDMED) ont déjà organisé des formations internes à l'utilisation d'Arbocarto.

Les organismes disposant déjà de secteurs d'intervention de leurs agents (Ile de la Réunion - utilisateur depuis 2016 des applications Alborun puis Arbocarto- et Mayotte - utilisateur depuis 6 mois d'Arbocarto) utilisent Arbocarto de manière opérationnelle à une fréquence hebdomadaire ou mensuelle selon les périodes de l'année. Les autres organismes formés sur les versions précédentes d'Arbocarto utilisent le logiciel sur d'autres zones urbaines que celles fournies pendant les sessions de formation et doivent donc préparer les jeux de données correspondants (fichiers environnementaux, données météorologiques), en interne pour ceux qui disposent de ressources humaines ou d'un service dédié avec des compétences en géomatique, ou en sous-traitance.

L'intérêt des acteurs de la lutte antivectorielle pour Arbocarto est grandissant. Pour répondre aux attentes et pérenniser l'utilisation d'Arbocarto, de nouveaux financements sont indispensables, tant pour continuer à améliorer et développer l'outil, que pour animer la communauté utilisateurs.

COMMUNICATION

Tout au long du projet, des actions de communication et de vulgarisation autour d'Arbocarto ont été mises en œuvre, en particulier :

- Maintenance du site web www.arbocarto.fr avec l'intégration d'un volet de gestion des demandes d'utilisation de l'application en place du Ministère ;
- Rédaction d'un chapitre d'ouvrage dédié à la présentation Arbocarto (en français) aux éditions QUAE ;
- Présentation d'Arbocarto à divers séminaires scientifiques et institutionnels (6).

> SITE INTERNET

Le site internet dédié à l'outil Arbocarto (www.arbocarto.fr) a été développé dans le cadre du projet Arbocarto-V2 (financement CNES). Il contient toutes les informations sur l'outil (fonctionnement, partenaires et financement, documentation), sur les formations et les publications relatives à l'outil.

Dans le cadre du projet Arbocarto-V3, un formulaire en ligne de demande de mise à disposition de l'outil (Figure 13) a été développé afin de faciliter la diffusion de l'outil, dans le cadre d'une convention de sous-traitance de données à caractère personnel relatif à l'application Arbocarto signée entre la DGS et le CIRAD (novembre 2022). D'autre part, la rubrique « Actualités » a été régulièrement mise à jour pour diffuser les informations en lien avec l'outil.

Figure 13 : Captures d'écran du site www.arbocarto.fr, formulaire de demande de mise à disposition et rubrique des actualités.

> PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES

Chapitre d'ouvrage (en français)

Marti R., Demarchi M., Castets M., Tran A. 2022. Arbocarto : un modèle mécaniste fondé sur le cycle de vie des moustiques *Aedes*. In : Tran Annelise (ed.), Daudé Eric (ed.), Catry Thibault (ed.). Télédétection et modélisation spatiale. Applications à la surveillance et au contrôle des maladies liées aux moustiques. Versailles : Ed. Quae, p. 109-118. (Update sciences et technologies). eBook disponible en accès libre : https://www.quae.com/produit/1784/9782759236299/teledetection-et-modelisation-spatiale

Publications scientifiques (en anglais)

Lamy K., Tran A., Portafaix T., Leroux M.D., Baldet T. 2023. Impact of regional climate change on the mosquito vector *Aedes albopictus* in a tropical island environment: La Réunion. Science of the Total Environment, 875: 162484.

Communications orales lors de conférences internationales (en anglais)

Catry T., Tran A., Hoarau O., Pillot B., Habchi-Hanriot N., Teillet C.. 2022. Predicting tiger mosquito breeding sites through earth observation and statistical analysis. Irvine : University of California, GEOMED 2022, 2022-10-12/2022-10-14, Irvine (Etats-Unis).

Marti R., Castets M., Demarchi M., et al. 2022. ARBOCARTO: an operational spatial modeling tool to predict the dynamics of Aedes mosquito species from weather and environmental variables. Living Planet Symposium, Bonn, Allemagne.

Marti R., Castets M., Demarchi M., et al. 2022 ARBOCARTO: an operational spatial modeling tool to predict Aedes dynamics and the impact of vector control interventions.5th international workshop on *Aedes albopictus*, Montpellier, France .

> COMMUNICATION AUPRES DES ELUS ET ACTEURS DE SANTE

- Journées scientifiques du DP One Health Océan Indien, Saint-Denis, Réunion, juin 2022
- Journées d'animation scientifique " Vecteurs & ravageurs, contrôle et biodiversité "du Vectopole Sud- Anses, Agropolis international Montpellier, 9-10 novembre 2022
- Journées scientifiques du Centre d'Expertise "Risques et Maladies infectieuses" du pôle Theia, 15-18 novembre 2022
- Journée rencontre scientifique et entreprises, Montpellier, 19 janvier 2023

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les objectifs du projet Arbocarto-V3 ont été remplis, avec la mise à disposition à la DGS et aux acteurs de santé publique d'une nouvelle version permettant de générer des cartes prédictives du R_0 - taux de reproduction de base de la dengue (indice de risque épidémiologique) - en plus des estimations d'abondance des moustiques *Aedes* (indice de risque entomologique).

38 personnels formés

13 institutions

8 sites géographiques :

Bordeaux, Grenoble, Guadeloupe, Ile de la Réunion, Martinique, Mayotte, Montpellier, Strasbourg

Deux sessions de formation, aux Antilles et en France hexagonale, ont été réalisées, avec un total de 38 participants de 13 organismes différents et de 8 sites géographiques, pour lesquels les jeux de données d'entrée de l'outil Arbocarto ont été complétés ou créés. Ces formations contribuent à la préparation et au renforcement des capacités de gestion et d'anticipation des différents acteurs en charge de la prévention et du contrôle des arboviroses transmises par les moustiques *Aedes,* dans les Territoires Ultra Marins et en France hexagonale.

Les discussions de la session « Retours utilisateurs » de Mai 2023 ont confirmé l'intérêt des acteurs de santé publique et de la lutte antivectorielle pour Arbocarto. Des attentes ont été exprimées tant pour des développements informatiques de l'outil que pour un accompagnement à son utilisation et l'animation de la communauté utilisateurs.

Pour répondre à ces attentes, les perspectives de développement envisagées sont les suivantes :

- A court terme :
  - L'intégration de nouvelles fonctionnalités d'action de contrôle et de lutté intégrée (en particulier Technique de l'Insecte Stérile, autodissémination, piégeage de masse) ;
  - L'amélioration de l'ergonomie de la fenêtre option Actions de LAV, pour plus de paramétrages dynamiques (gestion temporelle notamment) ;
  - La traduction de l'interface suite à diverses demandes d'utilisations d'Arbocarto dans d'autres pays, dans la zone Océan Indien et en Amérique du Sud notamment ;
- A moyen terme :
  - Le développement d'un module de simulation de l'impact du changement climatique, via l'utilisation d'autres sources de données dans des formats différents des relevés météorologiques actuels ;
  - Le développement d'un module permettant aux utilisateurs avancés d'ajouter de nouvelles espèces (par exemple moustiques du genre *Anopheles*, vecteurs du paludisme, ou *Culex,* vecteur de la fièvre du Nil Occidental), de modifier les paramètres et les fonctions des modèles de dynamique de population de moustiques ;
  - La prise en compte du déplacement du moustique entre cellules : ceci présente un intérêt pour lancer des simulations sur des parcelles de très petite taille et/ou dans un contexte géographique peu favorable (zones d'altitude), ainsi que pour simuler les phénomènes de recolonisation après une forte action de LAV.

D'autre part, afin de pérenniser les échanges entre utilisateurs, les perspectives d'accompagnement comprennent un appui aux utilisateurs (hot-line, forum, FAQ), l'animation du site internet, l'organisation d'ateliers annuels.

Pour la mise en œuvre de ces différentes perspectives, l'équipe Arbocarto dispose des résultats de recherche, obtenus sur la base du modèle mécaniste de prédiction de population de moustiques, d'une grande partie des perspectives proposées (Douchet et al., 2021; Haramboure, 2020; Lamy et al., 2023). L'échéancier de mise en œuvre sera donc principalement fonction (i) des moyens financiers à venir (aucun financement n'est pour l'instant identifié à la suite du projet ARBOCARTO-V3) et (ii) de la charge de développement nécessaire pour l'intégration dans l'interface d'Arbocarto.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Benkimoun, S., Atyame, C., Haramboure, M., Degenne, P., Thébault, H., Dehecq, J.-S., Tran, A., 2021. Dynamic mapping of dengue basic reproduction number. Results in Physics 29, 104687. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104687

Cailly, P., Tran, A., Balenghien, T., L'Ambert, G., Toty, C., Ezanno, P., 2012. A climate-driven abundance model to assess mosquito control strategies. Ecological Modelling 227, 7–17. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.10.027

Cochet, A., Calba, C., Jourdain, F., Grard, G., Durand, G.A., Guinard, A., team, I., Noël, H., Paty, M.-C., Franke, F., 2022. Autochthonous dengue in mainland France, 2022: geographical extension and incidence increase. Eurosurveillance. https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2022.27.44.2200818

Comité de Veille et d'Anticipation des Risques Sanitaires (COVARS), 2023. Avis du 3 avril 2023 sur les risques sanitaires de la dengue et autres arboviroses à *Aedes* en lien avec le changement climatique.

Douchet, L., Haramboure, M., Baldet, T., L'Ambert, G., Damiens, D., Gouagna, L.C., Bouyer, J., Labbé, P., Tran, A., 2021. Comparing sterile male releases and other methods for integrated control of the tiger mosquito in temperate and tropical climates. Sci Rep 11, 7354. https://doi.org/10.1038/s41598-021-86798-8

Ezanno, P., Aubry-Kientz, M., Arnoux, S., Cailly, P., L'Ambert, G., Toty, C., Balenghien, T., Tran, A., 2015. A generic weather-driven model to predict mosquito population dynamics applied to species of *Anopheles*, *Culex* and *Aedes* genera of southern France. Preventive Veterinary Medicine 120, 39–50. https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2014.12.018

Haramboure, M., 2020. Modélisation de la dynamique des populations naturelles d'*Aedes albopictus* et réponse à la lutte anti-vectorielle (thèse). Université de Montpellier.

Lamy, K., Tran, A., Portafaix, T., Leroux, M.D., Baldet, T., 2023. Impact of regional climate change on the mosquito vector *Aedes albopictus* in a tropical island environment: La Réunion. Science of The Total Environment 875, 162484. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162484

Marti, R., Demarchi, M., Castets, M., Tran, A., 2023. Arbocarto : un modèle mécaniste fondé sur le cycle de vie des moustiques *Aedes*, in: Télédétection et Modélisation Spatiale. Applications à La Surveillance et Au Contrôle Des Maladies Liées Aux Moustiques, Update Sciences et Technologies. Quae, Versailles, pp. 109–118.

Marti, R., Li, Z., Catry, T., Roux, E., Mangeas, M., Handschumacher, P., Gaudart, J., Tran, A., Demagistri, L., Faure, J.-F., Carvajal, J.J., Drumond, B., Xu, L., Herbreteau, V., Gurgel, H., Dessay, N., Gong, P., 2020. A Mapping Review on Urban Landscape Factors of Dengue Retrieved from Earth Observation Data, GIS Techniques, and Survey Questionnaires. Remote Sensing 12, 932. https://doi.org/10.3390/rs12060932

Smith, D.L., Battle, K.E., Hay, S.I., Barker, C.M., Scott, T.W., McKenzie, F.E., 2012. Ross, Macdonald, and a Theory for the Dynamics and Control of Mosquito-Transmitted Pathogens. PLOS Pathogens 8, e1002588. https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002588

Tran, A., L'Ambert, G., Lacour, G., Benoît, R., Demarchi, M., Cros, M., Cailly, P., Aubry-Kientz, M., Balenghien, T., Ezanno, P., 2013. A rainfall- and temperature-driven abundance model for *Aedes*

albopictus populations. International journal of environmental research and public health 10, 1698–1719. https://doi.org/10.3390/ijerph10051698

Tran, A., Mangeas, M., Demarchi, M., Roux, E., Degenne, P., Haramboure, M., Le Goff, G., Damiens, D., Gouagna, L.-C., Herbreteau, V., Dehecq, J.-S., 2020. Complementarity of empirical and process-based approaches to modelling mosquito population dynamics with *Aedes albopictus* as an example—Application to the development of an operational mapping tool of vector populations. PLoS ONE 15, e0227407. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227407

Environnement et Sociétés, Unité Mixte de Recherche Territoires Environnement Télédétection et Information Spatiale, Montpellier

Maison de la Télédétection

500 rue Jean-François Breton

34093 Montpellier Cedex 5

Contact : arbocarto@teledetection.fr

www.cirad.fr